

Интенсификация вакуум-сублимационной сушки плодов калины за счет предварительной обработки низкотемпературной плазмой

Кубанский государственный
технологический университет,
г. Краснодар, Российская Федерация

О. И. Андреева, И. А. Шорсткий

КОРРЕСПОНДЕНЦИЯ:

Андреева Оксана Ивановна

E-mail: oksana_andreeva2001@mail.ru

ЗАЯВЛЕНИЕ О ДОСТУПНОСТИ ДАННЫХ:

данные текущего исследования
доступны по запросу
у корреспондирующего автора.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Андреева, О. И., & Шорсткий, И. А.
(2024). Интенсификация вакуум-сублимационной сушки плодов калины за счет предварительной обработки низкотемпературной плазмой. *Хранение и переработка сельхозсырья*, 32(2), 89–98.
<https://doi.org/10.36107/spfp.2024.2.560>

ПОСТУПИЛА: 03.10.2023

ДОРАБОТАНА: 27.05.2024

ПРИНЯТА: 15.06.2024

ОПУБЛИКОВАНА: 30.06.2024

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

авторы сообщают об отсутствии
конфликта интересов.



АННОТАЦИЯ

Введение: Длительность классической вакуум-сублимационной сушки при переработке цельных ягод дикоросов может достигать более 120 часов, что напрямую влияет на доступность конечного продукта для потребителей. В связи с этим поиск решений снижения длительности процесса вакуум-сублимационной сушки с сохранением высокого качества получаемого продукта является актуальной производственной задачей.

Цель: Интенсификация вакуум-сублимационной сушки плодов калины за счет формирования дополнительных каналов на поверхностной оболочке с применением предварительной обработки низкотемпературной плазмой, для уменьшения общей длительности сушки данного вида сырья.

Материалы и методы: В качестве вариации обработки низкотемпературной плазмой были выбраны режим слаботочного искрового и дугового разряда при поддержке термоэлектронной эмиссии. Обезвоженные с помощью вакуум-сублимационной сушки плоды калины анализировали на предмет микроструктурных изменений, кинетики сушки и показателей качества. Обработку низкотемпературной плазмой проводили на установке в режиме напряженности поля 8 кВ/см и 6 кВ/см и величиной тока разряда 1 мА и 10 мА, для искрового и дугового режима соответственно.

Результаты: Предварительная обработка низкотемпературной плазмой в режиме дугового разряда значительно интенсифицирует процесс вакуум-сублимационной сушки плодов за счет формируемых каналов на поверхности покровной оболочки. Предварительная обработка низкотемпературной плазмой позволила увеличить скорость сушки в три раза и снизить общую длительность процесса. Показатели качества обезвоженных плодов калины с предварительной обработкой низкотемпературной плазмой сохранились на высоком уровне.

Выводы: Доказана целесообразность применения обработки низкотемпературной плазмы на этапе подготовки плодово-ягодного сырья к процессам вакуум-сублимационной сушки. Подобранный режим слаботочного разряда позволяет уменьшить общие материальные и энергетические затраты. Данная работа вносит вклад в развитие электрофизических методов для интенсификации сложных процессов тепломассопереноса.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

переработка дикоросов; консервирование пищевых продуктов; обработка низкотемпературной плазмой; вакуумная сублимационная сушка; плод калины

The Intensification of Vacuum Freeze Drying of Viburnum Fruits Utilizing Low-Temperature Plasma Pre-Treatment

Kuban State Technological University,
Krasnodar, Russian Federation

Oksana I. Andreeva, Ivan A. Shorstky

CORRESPONDENCE:

Andreeva Oksana Ivanovna

E-mail: oksana_andreeva2001@mail.ru

DATA AVAILABILITY:

Data from the current study are available upon request from the corresponding author.

FOR CITATIONS:

Andreeva, O.I., & Shorstky, I.A. (2024). The intensification of vacuum freeze drying of viburnum fruits utilizing low-temperature plasma pre-treatment. *Storage and Processing of Farm Products*, 32(2), 89–98.
<https://doi.org/10.36107/spfp.2024.2.560>

RECEIVED: 03.10.2023

REVISED: 27.05.2024

ACCEPTED: 15.06.2024

PUBLISHED: 30.06.2024

DECLARATION OF COMPETING

INTEREST: none declared.



ABSTRACT

Introduction: The duration of classical vacuum freeze drying during the processing of whole wild berries can reach more than 120 hours directly affecting the availability of the final product to consumers. In this regard, the search for solutions to reduce the duration of the vacuum freeze drying process while maintaining the high quality of the resulting product is an urgent production task.

Purpose: Intensification of vacuum freeze drying of viburnum fruits due to the formation of additional channels on the surface shell using pre-treatment with low-temperature plasma to reduce the total drying time of this type of raw material.

Materials and Methods: Low-current spark and arc discharge modes supported by thermionic emission were chosen as a variation of low-temperature plasma treatment. Viburnum fruits dehydrated by vacuum freeze drying were analyzed for microstructural changes, drying kinetics and quality indicators. Low-temperature plasma treatment was carried out on the installation in the field strength mode of 8 kV/cm and 6 kV/cm and the discharge current values of 1 mA and 10 mA for spark and arc modes, respectively.

Results: It is shown that pre-treatment with low-temperature plasma in the arc discharge mode significantly intensifies the process of vacuum freeze drying of fruits due to the channels formed on the surface of the integument. Pre-treatment with low-temperature plasma made it possible to increase the drying speed by three times and reduce the overall duration of the process. The quality indicators of dehydrated viburnum fruits with pre-treatment with low-temperature plasma remained at a high level.

Conclusion: Current study demonstrates the efficiency of using low-temperature plasma treatment at the stage of preparing fruit and berry raw materials for vacuum freeze drying processes. The selected low-current discharge mode allows to reduce the total material and energy costs. This work contributes to the development of electrophysical methods for the intensification of complex heat and mass transfer processes.

KEYWORDS

wild-crops processing; food products preservation; low-temperature plasma treatment; vacuum freeze-drying; viburnum fruits

ВВЕДЕНИЕ

Повышение производительности вакуумно-сублимационной сушки, уменьшение общих материальных и энергетических затрат на процесс, сохранение товарного вида продукта являются актуальными производственными задачами для производителей сублимированной продукции. В фокусе внимания рынка FoodNet¹ находятся дикоросы — источники широкого спектра микро и макронутриентов (Сычева et al., 2019). Среди последних в промышленной переработке широкое распространение получили плоды калины, земляники, клюквы (Rudy et al., 2015; Alifaki et al., 2022; Shishegarha et al., 2002).

В ягодах калины сосредоточен уникальный комплекс различных витаминов, эфирных масел, аминокислот, фитонцидов, дубильных и пектиновых веществ (Alifaki et al., 2022; Тихонов, Типсина, 2017). Также калина содержит большое количество важных антиоксидантов (антоцианы, флавоноиды и др.). Общее количество антоцианов в плодах свежей калины насчитывается свыше 3 г/100 г сухих веществ (Шестопалова & Уварова, 2012). Столь высокое содержание антоцианов делает калину перспективным объектом исследований и переработки. Однако широкой промышленной переработке калины препятствует наличие прочной восковой оболочки, что увеличивает длительность вакуум-сублимационной сушки до 70–80 часов (Kajszczak et al., 2020). Следовательно, необходимо правильно подготовить структуру плодов калины к последующей сушке, при этом решение должно удовлетворять показателям качества получаемой продукции и быть эффективным.

Одним из перспективных направлений решения задачи ускорения сушки плодов калины является правильная подготовка к процессам сушки не нарушающая целостности самих ягод (Krzykowski et al., 2018). На момент проведения исследования известны различные технологии предварительной обработки перед сублимацией: химические (использование гипертонического раствора (Roueita et al., 2020; Lewicki et al., 2002) механи-

ческие (сжатие, сплющивание) (Rittiphet et al., 2021), физические (ультразвуковое воздействие, СВЧ-обработка, применение импульсного электрического поля, обработка низкотемпературной плазмой) (Warne et al., 2023; Liu et al., 2021; Loureiro et al., 2021; Shishir et al., 2020; Zhang et al., 2019); Li, Zhou, & Lu, 2023; Ashtiani et al., 2020; Wu et al., 2020; Islam et al., 2015; Ren & Bai, 2018; Duan et al., 2010; Falacińska et al., 2021; Pańka D et al., 2022; Ricce et al., 2016; Fauster et al., 2020; Lammerskitten et al., 2019). Различные методы предварительной обработки используются не только для ускорения процесса сушки, но и для сохранения физических свойств и биологически активных соединений в лиофилизированных пищевых продуктах (Dziki, 2020).

Перспективным и активно развивающимся методом интенсификации выхода влаги из плодов калины на этапе сублимационной сушки среди прочих является применение предварительной обработки сырья низкотемпературной плазмой (НП). Данный вид предварительной обработки растительного сырья зарекомендовал себя как эффективный при подготовке сырья к тепловой сушке (Giancaterino et al., 2024). Обработка НП позволяет сократить длительность сублимационной сушки, уменьшить энергетические и материальные затраты технологии. Авторами (Ashtiani et al., 2020) получены данные эффективного применения низкотемпературной плазмы для сушки грибов и снижение общей длительности процесса на 37 %. При этом показатели качества в том числе содержание антиоксидантов, полифенолов и витамина были на 36 %, 45 % и 124 % выше чем в контрольном. Эффект применения НП для сушки плодов томата позволил снизить общую длительность сушки на 25 % (Obajemihi et al., 2024).

Цель текущего исследования — интенсификация вакуум-сублимационной сушки плодов калины за счет формирования дополнительных каналов на поверхностной оболочке с применением предварительной обработки низкотемпературной плазмой, для уменьшения общей длительности сушки данного вида сырья.

¹ Крупнейший рынок потребительской продукции в мире, открытый для интеграции новых наукоемких технологий, от роботизации и ИТ в сегментах Агротех и Фудтех до биотехнологий, стимулирующий рост экономики и способный радикально повысить доступность и качество питания.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материалы

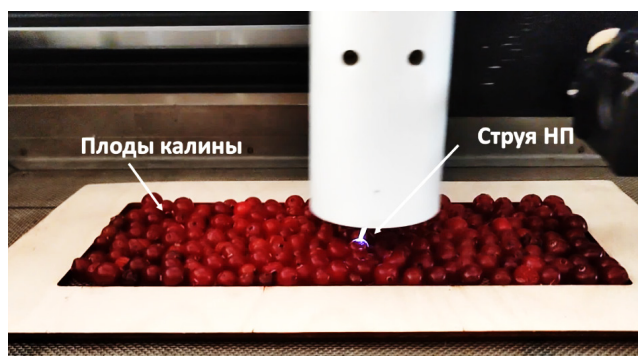
Объект исследования — свежая ягода калины, 2023 года урожая, приобретенная на местном рынке в городе Краснодар. Исходная влажность ягоды составляла $85 \pm 0,2\%$. Определение влажности исходной ягоды происходило на анализаторе влажности ЭВЛАС-2М (Россия). Температура внутри камеры анализатора влажности составляла 130°C , при пороге $0,03\%$.

Методы, оборудование и процедура исследования

Обработка низкотемпературной плазмой атмосферного давления проводилась на установке АС-П800 (Техника плазмы, Россия) в режиме слаботочного разряда при поддержке термоэлектронной эмиссии. В качестве вариации рассмотрены режимы искрового разряда (опыт А) при напряженности поля 8 кВ/см и током разряда 1 мА , дугового разряда (опыт Б) при напряженности поля 6 кВ/см и токе разряда 10 мА и образцы без обработки (опыт В). Процесс обработки проводился при условиях атмосферного давления и температуре окружающей среды 23°C . Ягоды были уложены в один слой общей площадью $0,06\text{ м}^2$. Длительность обработки навески 100 граммов проводилась в течении 1 минуты методом сканирования со скоростью движения катода $0,1\text{ м/с}$. Детальное описание установки представлено в Соснин & Шорсткий (2023).

Рисунок 1

Процесс обработки НП плодов калины в режиме искрового разряда по опыту А



Процесс обработки НП на установке (Рисунок 1) представляет собой непосредственное воздействие струи низкотемпературной плазмы, состоящей из катионов, анионов, свободных и возбужденных электронов и ряда летучих атомов и молекул на структуру материала плодов калины.

Обработка НП относится к нетепловому методу воздействия на сырье. Струя плазмы принимающим образом воздействует на плоды калины, формируя сквозные микроканалы на поверхности оболочки. При указанных режимах обработки температура продукта менялась на величину не более 3°C .

Исследование поверхностной микроструктуры обработанной ягоды проводилось на поляризационном микроскопе МИН-8 (Россия). Объект исследования фиксировался на предметном столе. Изображение поверхности ягоды (покровной оболочки) получали с использованием электронной камерой.

Вакуум-сублимационную сушку проводили в сушилке LAB 3 (СХ-техника, Россия) при температуре полок 45°C и давлении в камере 100 Па . Температура десублиматора составляла минус 33°C . В сушилке происходит основной процесс — переход вещества из твердого состояния в газообразное, минуя жидкую фазу. Сравнение образцов обработанной НП и необработанной проводилось при одинаковых условиях. Непосредственно после обработки НП образцы направлялись на стадию заморозки. Заморозка ягоды калины проводилась непосредственно в вакуумной сублимационной сушилке при температуре минус 45°C в течение 4 ч . Известно, что шоковая заморозка положительно влияет на качество продукта. В процессе заморозки в продукте образуются мелкие кристаллы льда, что в незначительной степени влияет на структуру внутри продукта, сохраняет целостность (Гусейнова et al., 2021).

Анализ данных

Исследование скорости и кинетики сушки плодов калины проводилось при различных промежутках времени в различных опытах ($6, 12, 24; 48; 72\text{ ч}$) до достижения требуемой влажности 5% .

Величину скорости сушки определяли по уравнению

$$\text{Скорость_сушки} = \frac{M_{i+\Delta i} - M_i}{\Delta i},$$

где $M_i + \Delta_i$ и M_i — масса в любой момент времени i и Δi , кг/кг.

Проанализирована логарифмическая модель сушки, как наиболее подходящая для сушки с периодом падающей скорости сушки (Grimi N. et al., 2010):

$$E = a \cdot \exp(-k \cdot \tau) + b,$$

Был проведен регрессионный анализ. Исследованы значения R^2 , RMSE (средняя квадратичная ошибка) и CRV (коэффициент остаточной вариации).

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (E_{i,p} - E_p)^2}{\sum_{i=1}^N (E_{i,e} - E_p)^2},$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (E_{i,p} - E_{i,e})^2}{N}},$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (E_{i,p} - E_{i,e})^2}{N - o},$$

$$CRV = 100 \cdot \frac{\sqrt{\chi^2}}{Y},$$

В данных уравнениях $E_{i,p}$ — безразмерный показатель влажности; $E_{i,e}$ — экспериментальное безразмерное значение влажности; E_p — средняя безразмерная влажность; N — количество замеров; o — число констант в уравнении; Y — среднее значение E .

Полученные данные представлены в Таблице 1.

После сублимационной сушки проводили анализ содержания антоцианов в обезвоженных плодах калины спектрофотометрическим методом. Извлечение антоцианов осуществляли в соответствии с методикой (Курдюков соавт., 2021). Использовали водный раствор с этанолом (40%) с последующим нагреванием в водяной бане в течение 60 мин. Измерение оптической плотности осуществляли на спектрофотометре ПЭ-5300ВИ (Россия). Содержание суммы антоцианов в пересчете на цианидина-3-О-гликозид и абсолютно сухое сырье в процентах (X) вычисляли по формуле:

$$X = \frac{D \cdot 50 \cdot 25 \cdot 100}{250 \cdot m \cdot 4(100 - W)},$$

где D — оптическая плотность раствора;

250 — удельный показатель поглощения цианидина-3-О-гликозида при длине волны 625 нм, безразмерная величина;

m — навеска сырья, г;

W — влажность сырья, %.

100 — вместимость колбы с 0,5 г измельченного материала и 50 мл 40-%этилового спирта (раствор экстракта), мл;

50 — объем 40-% этилового спирта, мл;

25 — вместимость колбы с 4 мл раствора экстракта, доведенного до метки растворителем, мл.

4 — объем раствора экстракта, мл.

Статистическую обработку экспериментальных данных проводили с помощью метода математической статистики. Все эксперименты проводили с трехкратной повторностью. Статистический анализ проводился с помощью программ STATISTICA 13 (Statsoft, США) и Excel (Microsoft, США).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ микроструктуры оболочки

В процессе анализа микроструктуры покровной оболочки плодов калины после обработки низкотемпературной плазмой было обнаружено, что на поверхности ягод возникают дополнительные каналы.

На Рисунке 2 продемонстрирована поверхность ягоды калины до и после обработки НП в режимах искрового и дугового разряда. При обработке в режиме дугового разряда (опыт Б) на поверхности покровной оболочки калины в результате воздействия низкотемпературной плазмы сформировались кратеры со средним диаметром 25–65 мкм. Данный размер пор соответствует молекулярно-вязкостному режиму течения сублимационной сушки. При обработке низкотемпературной плазмой в режиме искрового разряда диаметр формируемых отверстий был меньше и плотность их формирования также меньше (Рисунок 2). Сопоставимые данные по размеру формируемых отверстий получены Miraei Ashtiani et al. (2020) при обработке ягод винограда скользящим искровым разрядом и Teng et al. (2020) СО² лазером при обработке плодов голубики. При обработке скользящим разрядом установлены отверстия диаметром 80–100 мкм, а при обработке лазером

до 150 мкм. При этом стоит отметить, что в отличие от работы Teng et al. (2020), в котором на единичной ягоде формировалось одно отверстие, нами получена более высокая плотность микропор.

Сформированные в результате обработки низкотемпературной плазмой микропоры становятся каналами для облегченного выхода влаги. За счет их наличия ускоряется процесс выхода влаги на стадии сублимации, что в дальнейшем влечет за собой уменьшение общей длительности процесса. Как отмечено авторами (Sette et al., 2016) для предотвращения вспучивания ягод (изменения геометрического размера при усушке), диаметр микропор должен находиться в диапазоне 25–30 мкм. Значительное изменение величины канала вывода пара (более 150 мкм) при сублимации приводит к изменению режима течения влаги из материала и как следствие потери БАВ (Sosnin & Shorstkii, 2020). Таким образом наличие новых каналов удаления влаги способствует формированию более развитой поверхности раздела фаз «лёд-газ», что ускоряет процесс вакуум-сублимационной сушки.

Анализ скорости и кинетики сушки

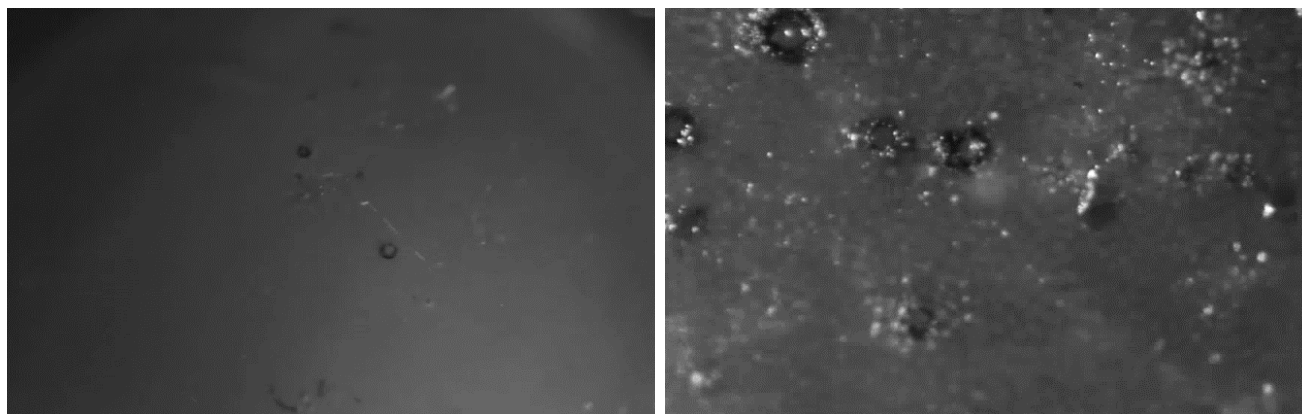
Полученные экспериментальным путем кривые сушки необработанной калины демонстрируют наличие падающего периода скорости осмотического и адсорбционного испарения влаги (Рисунок 3). Данный факт говорит об отсутствии этапа удаления свободной влаги в плодах калины из-за наличия диффузионного барьера в виде покровной

оболочки. При этом на кривой скорости сушки, обработанной НП плодов калины замечен период постоянной сушки в течение первых 10 ч. Данное обстоятельство говорит о переходе влаги связанной в удерживаемую в капиллярах или свободную, выделившуюся на поверхности калины до этапа заморозки.

Экспериментально показано, что в результате предварительной обработки низкотемпературной плазмой длительность вакуум-сублимационной сушки плодов калины снизилась до 72 ч (для достижения влажности 5 %). При этом скорость сушки благодаря предварительной обработке НП возросла в три раза по сравнению со контрольным образцом при тех же условиях. Данная тенденция различия в скоростях сушки сохранилась на протяжении всей кривой скорости. Это свидетельствует о том, что сформированный от обработки НП канал сохранил свою геометрию на протяжении всего периода сублимационной сушки. Влияние на морфологию высушиваемых ягод при вакуум-сублимационной сушке отмечено в работах с применением ультразвука (Zhang et al., 2020; Алексеенко et al., 2023). Акустическая волна «выталкивает» влагу на поверхность продукта, что способствует снижению длительности процесса на 15–20 %. Для улучшения качества и внешнего вида черники при сублимации, была исследована предварительная обработка ягод черники CO₂-лазером Teng et al. (2020), что позволило снизить общую длительность сушки до 25 %. Эффект от предварительной обработки импульсным электрическим полем (Zhang et al., 2023) на процесс вакуум-сублимационной сушки плодово-ягодного сырья демонстрирует положи-

Рисунок 2

Поверхность ягоды калины после обработки НП



Примечание. Опыт А слева, опыт Б справа

тельные результаты при достижении «электропорации» мембран растительных клеток сырья. Так, в отличие от предлагаемого нами метода при обработке импульсным электрическим полем возможна обработка большого количества материала в жидкой среде, что потенциально влияет на производительность технологической линии. Авторами (Li et al., 2023) показана возможность применения газовой плазмы к процессам сушки плодов жимолости. Результаты показали тенденцию к снижению длительности сушки от возникающих эффектов протравливания поверхностной оболочки материала. Таким образом можно ответить, что доминирующая часть методов направлена на воздействие структуры поверхностной оболочки перерабатываемого материала.

Рисунок 3

Кривые сушки и скорости плодов калины для опытов А, Б, В

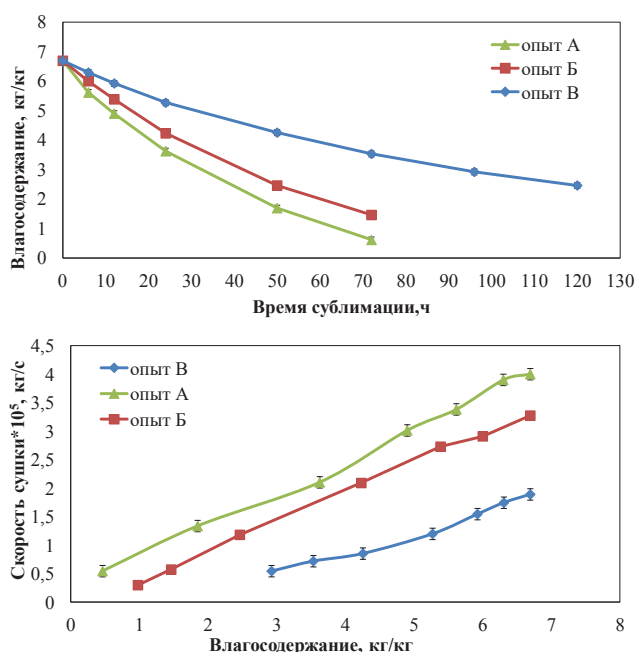


Таблица 1

Статистический анализ математической модели Logarithmic

Опыт	R ²	RMSE	χ^2	CRV, %
Опыт А	0,985	0,8784	0,286187	13,87
Опыт Б	0,998	0,6277	0,656743	20,84
Опыт В	0,998	0,0981	0,009624	2,1

Математическое моделирование скорости сушки

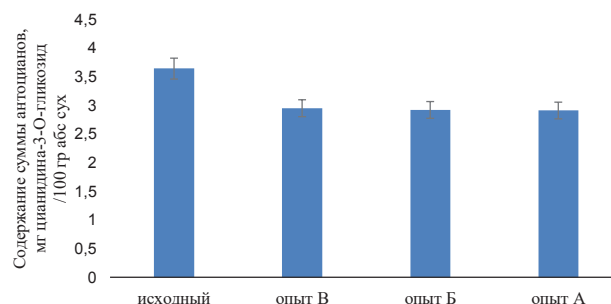
Математическое моделирование показало высокую схожесть логарифмической модели. Статистические данные значений R², RSME и CVR находятся в диапазоне 0,985–0,998, 0,098–0,878 и 0,009–0,656 (Таблица 1). Анализ указанных значений позволил установить, что выбранная модель сходится с экспериментальными данными.

Анализ содержания антоцианов в исследуемых образцах калины

Анализ содержания антоцианов в обезвоженной калине представлен на рисунке 4. В ходе экспериментов показано, что содержание обработанных НП (опыты А, Б) и необработанных обезвоженных плодов калины (опыт В и исходный материал) содержат порядка 3 мг цианидина-3-О-гликозид /100 г абс. сух. вещество.

Рисунок 4

Диаграмма содержания суммы антоцианов в исходном, обезвоженном без обработки НП



Примечание. (Исходный, опыт В) и обезвоженном после обработки НП плодов калины (опыты А, Б)

Полученные результаты содержания антоцианов в плодах калины совпадают с данными авторов Kajszczak et al. (2020). При этом исходное сырье показало величину порядка 3,7 мг цианидина-3-О-гликозид /100 г абс. сух. вещество. Данный факт подчеркивает высокую степень сохранности антоцианов, а также подчеркивает, что воздействие НП не способствует снижению данного показателя. Значения для исходного образца составляет 3,64 мг, образца не подвергавшегося обработки — 2,95 мг, для образца прошедшего обработку дуговым разрядом — 2,91 мг, для образца обработанного искровым разрядом — 2,92 мг.

Ограничения используемого подхода связаны с неравномерностью обработки при работе с крупным ягодами или ягодами, уложенными в несколько слоев. Поэтому данный метод эффективен при расположении растительного материала на лотке в один слой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе данной работы выявлено, что применение предварительной обработки низкотемпературной плазмой плодов калины позволилократно интенсифицировать процесс вакуум-сублимационной сушки. За счет формирования развитой поверхности раздела фаз от дополнительных каналов диаметром 25–65 мкм на поверхности восковой оболочки плодов калины удалось снизить общую длительность сушки более чем в 3 раза.

Полученные результаты показывают, что обработка низкотемпературной плазмой в режиме слабо-точного дугового разряда демонстрирует большую эффективность, в отличие от коронного разряда, снизив длительность сушки более чем в 3 раза. При этом режим коронного разряда также снизил длительность сушки в 2,5 раза по сравнению с образцами без обработки низкотемпературной плазмой.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Алексеевко, Е. В., Каримова, Н. Ю., & Цветкова, А. А. (2023). Способы переработки ягод черники: современное состояние и перспективы развития. *Хранение и переработка сельхозсырья*, (1), 22–44. <https://doi.org/10.36107/spfp.2023.353>
- Alekseenko, E. V., Karimova, N. Yu., & Tsvetkova, A. A. (2023). The current state and prospects for the development of

За счет применения нетепловой обработки, к которой относится НП, целостность плодов не нарушается, тем самым сохраняется товарный вид конечного продукта. Анализ содержания антоцианов показал, что предварительная обработка низкотемпературной плазмы позволяет сохранить данный показатель качества на высоком уровне (до 85% от исходного).

Для выявления рациональных режимов обработки низкотемпературной плазмы необходимы дальнейшие исследования по влиянию электрофизических показателей плазмы (частота и длительность разряда, величина тока и напряженности). Необходимо установить лимитирующие параметры толщины насыпного слоя перерабатываемых ягод с последующей технико-экономической и энергетической оценкой обработки низкотемпературной плазмы. Направления дальнейших исследований также будут направлены на изучение воздействия низкотемпературной плазмы на предварительно замороженное сырьё.

Применение предварительной обработки низкотемпературной плазмой в процессах вакуум-сублимационной сушки является перспективным методом снижения длительности процесса с сохранением высокого качества получаемой продукции.

АВТОРСКИЙ ВКЛАД

Андреева Оксана Ивановна: исследование / сбор данных; написание — редактирование и доработка рукописи, администрирование данных.

Шорсткий Иван Александрович: концепция / идея; методология; администрирование исследования, написание — редактирование и доработка рукописи.

methods for processing bilberries. *Storage and Processing of Farm Products*, (1), 22–44. (In Russ.) <https://doi.org/10.36107/spfp.2023.353>

Гусейнова, Б. М., Асабутаев, И. Х., & Даудова, Т. И. (2021). Оценка пригодности абрикосов к шоковой заморозке по физико-технологическим показателям качества.

- Вестник Международной академии холода*, (1), 74–83. <https://doi.org/10.17586/1606-4313-2021-20-1-74-83>
- Guseinova, B. M., Asabutayev, I. Kh., & Daudova, T. I. (2021). Assessment of apricots suitability for shock freezing according to physical and technological quality indicators. *Journal of International Academy of Refrigeration*, (1), 74–83. (In Russ.) <https://doi.org/10.17586/1606-4313-2021-20-1-74-83>
- Курдюков, Е. Е., Митишев, А. В., Водопьянова, О. А., Шелудякова, Ю. Б., & Финаенова, Н. И. (2021). Спектрофотометрическая методика количественного определения суммы антоцианов в сырье эвтерпы овощной (*Euterpe oleracea*). *Вестник Московского университета. Серия 2. Химия*, 62(6), 523–525.
- Kurdyukov, E. E., Mitishev, A. V., Vodopyanova, O. A., Sheludyakova, Yu. B., & Finaenova, N. I. (2021). Method of quantitative determination of the amount of anthocyanins in the raw materials of *Euterpe Oleracea*. *Lomonosov Chemistry Journal*, 62(6), 523–525. (In Russ.)
- Соснин, М. Д., & Шорсткий, И. А. (2023). Сушка яблочных чипсов с применением интеллектуальной обработки низкотемпературной атмосферной плазмой. *Техника и технология пищевых производств*, 53(2), 368–383. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2023-2-2442>
- Sosnin, M. D., & Shorstky, I. A. (2023). Cold atmospheric gas plasma processing of apple slices. *Food Processing: Techniques and Technology*, 53(2), 368–383. (In Russ.) <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2023-2-2442>
- Сычева, О. В., Шлыков, С. Н., & Омаров, Р. С. (2019). Научные принципы создания пищевых продуктов для персонализированного питания в соответствии с концепцией развития перспективного рынка «FoodNet». *Пищевая индустрия*, 1(39), 36–37.
- Sycheva, O. V., Shlykov, S. N., & Omarov, R. S. (2019). Scientific principles for creating food products for personalized nutrition according to the concept of developing the prospective market “FoodNet”. *Food Industry*, 1(39), 36–37. (In Russ.)
- Тихонов, С. Ю., & Типсина, Н. Н. (2017). Использование сухого сырья калины в кондитерских изделиях с повышенной пищевой ценностью. *Наука и образование: опыт, проблемы, перспективы развития* (с. 95–97). Красноярск: Изд-во Красноярского гос. аграр. ун-та.
- Tikhonov, S. Yu., & Tipsina, N. N. (2017). Use of dry viburnum raw materials in confectionery products with increased nutritional value. *Science and education: Experience, problems, development prospects* (pp. 95–97). Krasnoyarsk: Publishing House of Krasnoyarsk State Agrarian University. (In Russ.)
- Шестопалова, И. А., & Уварова, Н. А. (2012). Влияние экстрактов дикорастущих плодов и ягод на цвет рубленых полуфабрикатов из мяса птицы. *Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств»*, (1), 53.
- Shestopalova, I. A., & Uvarova, N. A. (2012). Influence of wild fruit and berry extracts on the color of minced poultry semi-finished products. *Scientific journal NRUITMO. Series Processes and Equipment for Food Production*, (1), 53. (In Russ.)
- Alifakı, Y. Ö., Şakıyan, Ö. & İsci, A. (2022). Investigation of storage stability, baking stability, and characteristics of freeze-dried cranberrybush (*Viburnum opulus* L.) fruit microcapsules. *Food and Bioprocess Technology*, 15(5), 1115–1132. <https://doi.org/10.1007/s11947-022-02805-4>
- Ashtiani, S. H. M., Rafiee, M., Morad, M. M., Khojastehpour, M., Khani, M. R., Rohani, A., & Martynenko, A. (2020). Impact of gliding arc plasma pretreatment on drying efficiency and physicochemical properties of grape. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 63, 102381. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102381>
- Ashtiani, S. H. M., Aghkhani, M. H., Feizy, J. & Martynenko, A. (2023). Effect of cold plasma pretreatment coupled with osmotic dehydration on drying kinetics and quality of mushroom (*Agaricus bisporus*). *Food and Bioprocess Technology*, 16(12), 2854–2876. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102381>
- Duan, X., Zhang, M., Mujumdar, A. S., & Wang, S. (2010). Microwave freeze drying of sea cucumber (*Stichopus japonicus*). *Journal of Food Engineering*, 96(4), 491–497. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2009.08.031>
- Dziki D. (2020). Recent trends in pretreatment of food before freeze-drying. *Processes*, 8(12), 1661. <https://doi.org/10.3390/pr8121661>
- Falacińska, J., Kowalska, H., Kowalska, J., Galus, S., Marzec, A., & Domian, E. (2021). The effect of pre-treatment (Blanching, ultrasound and freezing) on quality of freeze-dried red beets. *Foods*, 10(1), 132. <https://doi.org/10.3390/foods10010132>
- Fauster, T., Giancaterino, M., Pittia, P., & Jaeger, H. (2020). Effect of pulsed electric field pretreatment on shrinkage, rehydration capacity and texture of freeze-dried plant materials. *LWT*, 121(December 2019), 108937. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108937>
- Giancaterino, M., Werl, C., & Jaeger, H. (2024). Evaluation of the quality and stability of freeze-dried fruits and vegetables pre-treated by pulsed electric fields (PEF). *LWT*, 191, 115651. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.115651>
- Grimi, N., Mamouni, F., Lebovka N., Vorobiev, E., & Vaxelaire, J. (2010). Acoustic impulse response in apple tissues treated by pulsed electric field. *Biosystems Engineering*, 105(2), 266–272. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2009.11.005>
- Islam, M. N., Zhang, M., Liu, H., & Xinfeng, C. (2015). Effects of ultrasound on glass transition temperature of freeze-dried pear (*Pyrus pyrifolia*) using DMA thermal analysis. *Food and Bioprocess Processing*, 94(May 2013), 229–238. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2014.02.004>
- Kajszczak, D., Zakłós-Szyda, M., & Podśędek, A. (2020). *Viburnum opulus* L.—A review of phytochemistry and biological effects. *Nutrients*, 12(11), 3398. <https://doi.org/10.3390/nu12113398>
- Krzykowski, A., Dziki, D., Rudy, S., Gawlik-Dziki, U., Polak, R. & Biernacka, B. (2018). Effect of pre-treatment conditions and freeze-drying temperature on the process kinetics and physicochemical properties of pepper. *LWT*, 98, 25–30. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.08.022>

- Lammerskitten, A., Wiktor, A., Siemer, C., Toepfl, S., Mykhailiyk, V., Gondek, E., Rybak, K., Witrowa-Rajchert, D., & Parniakov, O. (2019). The effects of pulsed electric fields on the quality parameters of freeze-dried apples. *Journal of Food Engineering*, 252, 36–43. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.02.006>
- Lewicki, P. P., Vu Le, H., & Pomarańska-Łazuka, W. (2002). Effect of pre-treatment on convective drying of tomatoes. *Journal of Food Engineering*, 54(2), 141–146. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(01\)00199-6](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(01)00199-6)
- Li, J., Li, Z., Ma, Q., & Zhou, Y. (2023). Enhancement of anthocyanins extraction from haskap by cold plasma pretreatment. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 84, 103294. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2023.103294>
- Liu, Q., Wu, H., Luo, J., Liu, J., Zhao, S., Hu, Q., & Ding, C. (2021). Effect of dielectric barrier discharge cold plasma treatments on flavor fingerprints of brown rice. *Food Chemistry*, 352(3), 129402. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129402>
- Loureiro, A. D. C., Souza, F. D. C. D. A., Sanches, E. A., Bezerra, J. A., Lamarão, C. V., Rodrigues, S., Fernandes, F. A. N., & Campelo, P. H. (2021). Cold plasma technique as a pretreatment for drying fruits: Evaluation of the excitation frequency on drying process and bioactive compounds. *Food Research International*, 147. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110462>
- Miraei Ashtiani, S. H., Rafiee, M., Mohebi Morad, M., Khojastehpour, M., Khani, M. R., Rohani, A., Shokri, B., & Martynenko, A. (2020). Impact of gliding arc plasma pretreatment on drying efficiency and physicochemical properties of grape. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 63, 102381. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102381>
- Obajemihi, O. I., Cheng, J. H., & Sun, D. W. (2024). Novel cold plasma functionalized water pretreatment for improving drying performance and physicochemical properties of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) fruits during infrared-accelerated pulsed vacuum drying. *Journal of Food Engineering*, 112050. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2024.112050>
- Pańka, D., Jeske, M., Łukanowski, A., Baturo-Cieśniewska, A., Prus, P., Maitah, M., Maitah, K., Malec, K., Rymarz, D., Muhire, J. D., & Szwarc, K. (2022). Can cold plasma be used for boosting plant growth and plant protection in sustainable plant production? *Agronomy*, 12(4), 1–20. <https://doi.org/10.3390/agronomy12040841>
- Ren, Z., & Bai, Y. (2018). Ultrasound pretreatment of apple slice prior to vacuum freeze drying. *Proceedings of the 2nd International Conference on Material Science, Energy and Environmental Engineering* (pp. 112–117). Atlantis Press. <https://doi.org/10.2991/mseee-18.2018.20>
- Ricce, C., Rojas, M. L., Miano, A. C., Siche, R., & Augusto, P. E. D. (2016). Ultrasound pre-treatment enhances the carrot drying and rehydration. *Food Research International*, 89, 701–708. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2016.09.030>
- Rittiphet, C., Dumyang, K., & Matan, N. (2021). Effect of pre-mechanical compression on free water removal, drying collapses and associated internal voids of oil palm wood. *European Journal of Wood and Wood Products*, 79(4), 925–940. <https://doi.org/10.1007/s00107-021-01674-6>
- Roueita, G., Hojjati, M., & Noshad, M. (2020). Study of physicochemical properties of dried kiwifruits using the natural hypertonic solution in ultrasound-assisted osmotic dehydration as pretreatment. *International Journal of Fruit Science*, 20(S2), S491–S507. <https://doi.org/10.1080/15538362.2020.1741057>
- Rudy, S., Dziki, D., Krzykowski, A., Gawlik-Dziki, U., Polak, R., Różyło, R., & Kulig, R. (2015). Influence of pre-treatments and freeze-drying temperature on the process kinetics and selected physico-chemical properties of cranberries (*Vaccinium macrocarpon* Ait.). *LWT*, 63(1), 497–503. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.03.067>
- Sette P., Salvatori D., & Schebor C. (2016). Physical and mechanical properties of raspberries subjected to osmotic dehydration and further dehydration by air- and freeze-drying. *Food and Bioprocess Technology*, 100, 156–171. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2016.06.018>
- Shishegarha, F., Makhlof, J., & Ratti, C. (2002). Freeze-drying characteristics of strawberries. *Drying Technology*, 20(1), 131–145. <https://doi.org/10.1081/DRT-120001370>
- Shishir, M. R. I., Karim, N., Bao, T., Gowd, V., Ding, T., Sun, C., & Chen, W. (2020). Cold plasma pretreatment—A novel approach to improve the hot air drying characteristics, kinetic parameters, and nutritional attributes of shiitake mushroom. *Drying Technology*, 38(16), 2134–2150. <https://doi.org/10.1080/07373937.2019.1683860>
- Sosnin, M. D., & Shorstkii, I. A. (2020). Microplasma pretreatment of mango fruits during freeze drying with thermoelectric emission. *Food Processing: Techniques and Technology*, 50(4), 681–689. <https://doi.org/10.21603/2074>
- Warne, G. R., Lim, M., Wilkinson, K., Hessel, V., & Williams, P. M. (2023). Radiofrequency cold plasma — A novel tool for flavour modification in fresh and freeze-dried strawberries. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 90, 103497. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2023.103497>
- Wu, X.-fei, Zhang, M., Ye, Y., & Yu, D. (2020). Influence of ultrasonic pretreatments on drying kinetics and quality attributes of sweet potato slices in infrared freeze drying. *LWT*, 131, 109801. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109801>
- Teng, X., Zhang, M., Devahastin, S., & Yu, D. (2020). Establishment of lower hygroscopicity and adhesion strategy for infrared-freeze-dried blueberries based on pretreatments using CO₂ laser in combination with ultrasound. *Food and Bioprocess Technology*, 13, 2043–2053. <https://doi.org/10.1007/s11947-020-02543-5>
- Zhang, C., Lyu, X., Arshad, R. N., Aadil, R. M., Tong, Y., Zhao, W., & Yang, R. (2023). Pulsed electric field as a promising technology for solid foods processing: A review. *Food Chemistry*, 403, 134367. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.134367>
- Zhang, L., Liao, L., Qiao, Y., Wang, C., Shi, D., An K., & Hu, J. (2020). Effects of ultrahigh pressure and ultrasound pretreatments on properties of strawberry chips prepared by vacuum-freeze drying. *Food Chemistry*, 303, 125386. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125386>